

# СИНТЕЗ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНОГО КОМПОЗИТА СИСТЕМЫ Ti-Nb-Al

*Шамсутдинов Р.М., Юровских А.С.*

*Руководитель – профессор, к.т.н Демаков С.Л.*

*УрФУ имени первого президента Б.Н.Ельцина ИММт г.Екатеринбург*  
**demakof@mail.ru**

Изучена возможность получения интерметаллидных композитов системы титан-алюминий-ниобий, методом искрового плазменного спекания. Материалом служили фольги сплава ВТИ4 и Al. Синтез производился в два этапа: 1 этап, 600°C, выдержка 2 или 6 часов; 2 этап, 900, 1000°C выдержка 0,5 часов. В работе приведена принципиальная схема установки ИПС, микроструктуры, концентрационные профили перераспределения элементов, определен фазовый состав композитов. Получена высокая сплошность соединения при отсутствии трещин. Продемонстрирована возможность регулирования фазового состава за счет механического введения алюминия в ходе спекания.

## ВВЕДЕНИЕ

Алюминиды титана ( $TiAl$ ,  $Ti_3Al$ ,  $TiAl_3$ ) и сплавы на их основе относятся к новому классу легких жаропрочных материалов, которые предназначены для работы при температурах 600...1100 °C. В отличие от традиционных конструкционных материалов эти сплавы имеют уникальный комплекс механических свойств: высокие удельные прочностные свойства и упругие модули, сохраняющиеся до высоких температур, высокую жаропрочность, жаростойкость и сопротивление ползучести [1]. Существующие экспериментальные данные показывают, что реакции химического взаимодействия между титаном и алюминием на границах раздела могут лечь в основу новых технологий получения многослойных и композиционных материалов на основе алюминидов титана.

Тройная система Ti-Al-Nb [2] предлагает много интерметаллидов и имеет потенциал для обеспечения сплавов различными механическими свойствами. Но кроме проблем стабильности при высоких температурах (микроструктурных и связанных с окружающей средой), рассматриваемые материалы обычно слишком хрупкие при комнатной температуре и/или слишком мягкие при высокой температуре. Многофазные, в том числе и композитные, системы могут дать более оптимизированные свойства ползучести и разрушения. Контроль микроструктуры многофазных сплавов является ключевым элементом в получении желаемых свойств.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ

В данной работе материалом исследования служил интерметаллидный композит, полученный методом плазменно-искрового спекания (SPS) фольги толщиной 80 мкм из сплава ВТИ-4 состава Ti-21Al-25Nb-1V и

промышленной алюминиевой фольги толщиной 6 мкм. Поверхностный слой интерметаллидной фольги имел следы окислов и нитридов основных компонентов. Для их удаления перед проведением спекания поверхность подвергалась травлению в растворе азотной и плавиковой кислот. Пакет был составлен из чередующихся 4 интерметаллидных и 5 алюминиевых фольг, диаметром 20 мм. Непосредственно процесс спекания проводился на установке FCT-1025. Материалом оснастки служил высокопрочный графит. Схема установки ИПС приведена на рисунке 1.

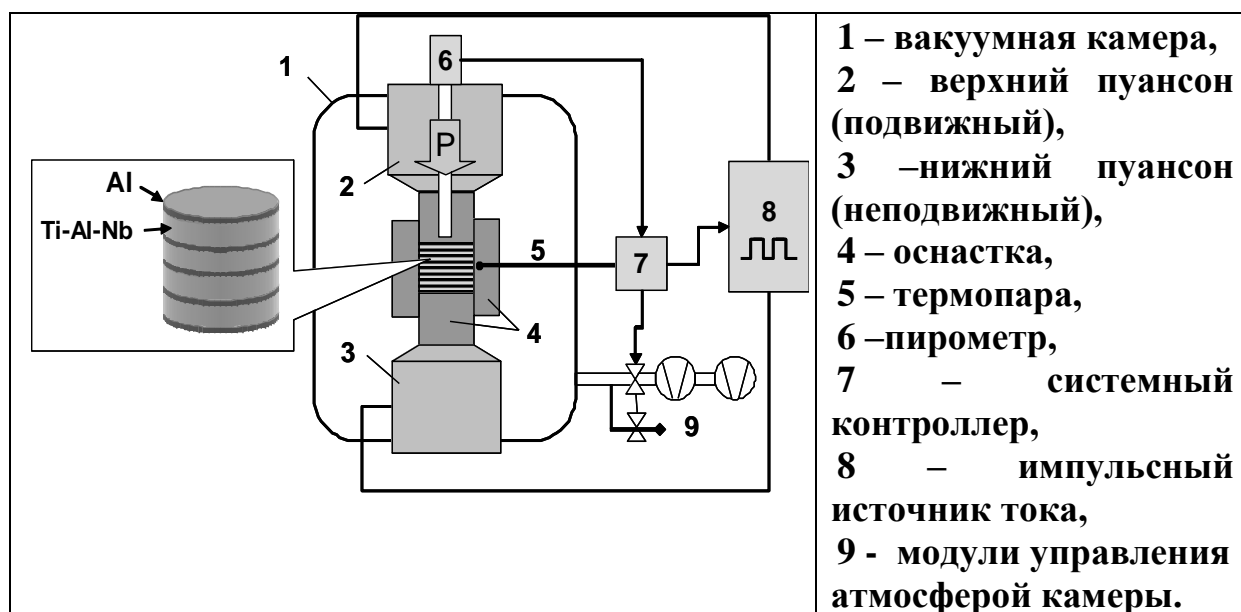


Рисунок 1. Блок-схема установки для спекания в плазме искрового разряда

Синтез производился в два этапа (таблица 1). Температура первого этапа была ниже температуры плавления алюминия и составляла 600 °С, время выдержки: 2 и 6 ч. Второй этап отжига производился при температурах 900; 1000°С – ниже и выше  $T_{\text{пл}}$  сплава ВТИ-4. Время выдержки – 0;5 ч. Основными методами исследования служили растровая электронная микроскопия и микрорентгеноспектральный анализ.

Таблица 1. Режимы синтеза

| Номер образца | I этап          |            | II этап         |            |
|---------------|-----------------|------------|-----------------|------------|
|               | Температура, °С | Время, мин | Температура, °С | Время, мин |
| 1             | 600             | 120        | -               | -          |
| 2             |                 | 360        |                 |            |
| 3             | 600             | 120        | 900             | 30         |
| 4             |                 | 120        | 1000            |            |
| 5             |                 | 360        | 900             |            |
| 6             | 600             | 360        | 1000            |            |

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

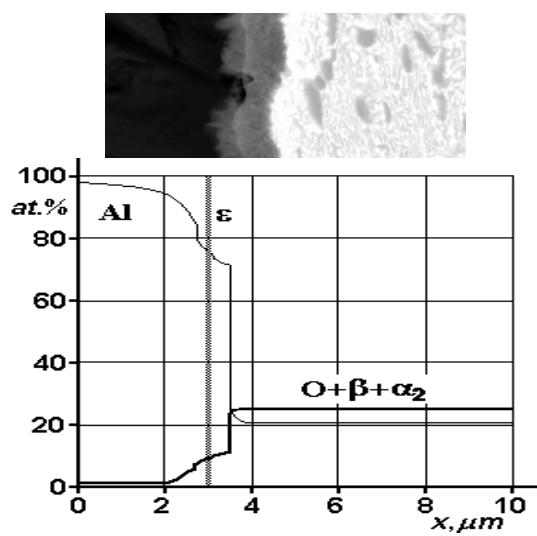
После первого этапа структура представлена тремя основными слоями (рисунки 2, 3, для образцов 1 и 2), два из которых представляют собой исходные компоненты - сплав ВТИ 4 и Al. Третий, вновь образованный, промежуточный слой является  $\epsilon$ -фазой,  $Al_3Ti$ , других диффузионных слоев обнаружено не было. В зависимости от времени обработки толщина промежуточного слоя увеличивается от 2 мкм при 2 часовой выдержке, до 4 мкм при 6 часовой выдержке. Сечение исходного Al соответственно уменьшилось от 5 до 2 мкм. На рисунках обозначено первоначальное положение границы Al/интерметаллид располагающейся на расстоянии 3 мкм от центра исходной алюминиевой фольги.

Из представленных данных на рисунке 3а следует, что полного усвоения Al (его превращения в  $Al_3Ti$ ) в ходе выдержки 6 часов не произошло. По данным работы [3] для полного превращения Al в интерметаллид требуется выдержка 6 часов при температуре 650°.

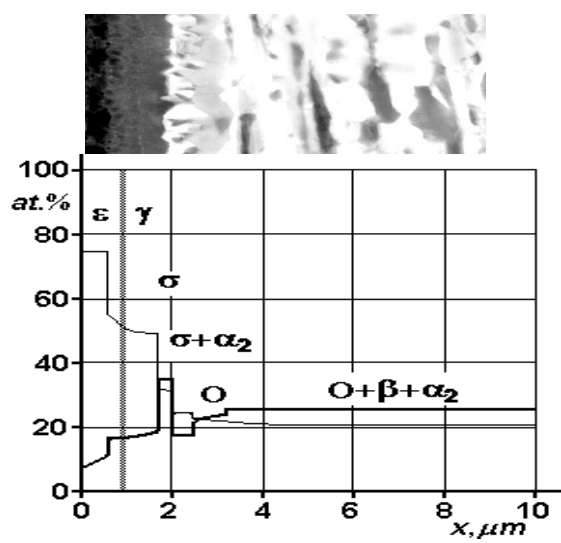
На втором этапе синтеза, согласно структурным данным и расчетам взаимных потоков Al,Ti,Nb через границу образцов 3 и 4 следует, что положение первоначальной границы перемещается в сторону центра алюминиевой фольги. Данный факт показывает, что Al вытесняется на боковую поверхность образца, это подтвердилось визуально при осмотре конечных образцов. При этом 6 часовая предварительная выдержка (рисунок 3) практически полностью предотвращает вывод Al на боковую поверхность в ходе протекания второго этапа. Очевидно выводу Al препятствуют выделения интерметаллидных частиц, располагающиеся за границей фронта Al/ $Al_3Ti$ , пример такой частицы обозначен стрелкой. Наличие давления на втором этапе и неполный вывод Al обеспечивает практически 100%-ю сплошность соединения.

На втором этапе увеличивается количество диффузионных слоев, связанное с перераспределением Al и Nb, порядок их возникновения можно проследить по изотермическим сечениям тройной диаграммы Ti,Al,Nb [4]. Нами зафиксировано наличие фаз  $\epsilon$ ,  $\gamma$ ,  $\beta_0$ ,  $\sigma$ ,  $\alpha_2$ . Существование  $\tau$ -фазы не подтверждено.

По мере повышения температуры диапазон крайних точек состава постепенно сужается, из-за усреднения элементного состава. При температуре 1000°C, образец 6, зафиксировано значительное диффузионное перераспределение которое привело уменьшению диффузионных фазовых слоев. Можно наблюдать отдельные прерывистые выделения  $\sigma$ -фазы, которые являются равновесными. Несмотря на высокую скорость перераспределения, использование температур 1000°C и выше неприемлемо из-за интенсивного роста зерна  $\beta$ -фазы интерметаллида, По-видимому более рациональна температура - 950°C, которая находится ниже  $T_{пп}$ .



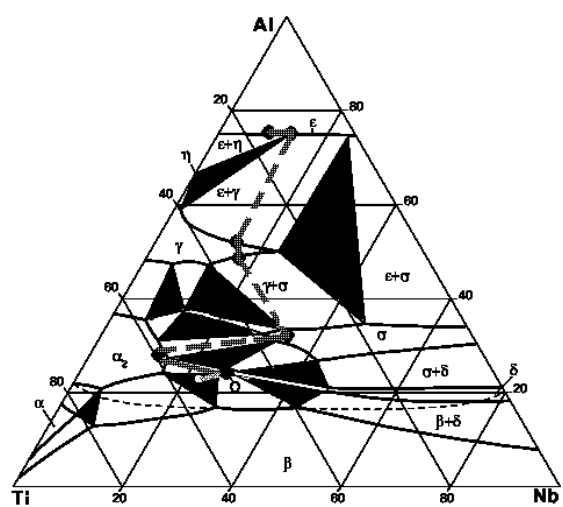
Образец 1



— Al  
— Nb

Образец 3

$T=900^{\circ}C$



**Образец 4**

**T=1000°C**

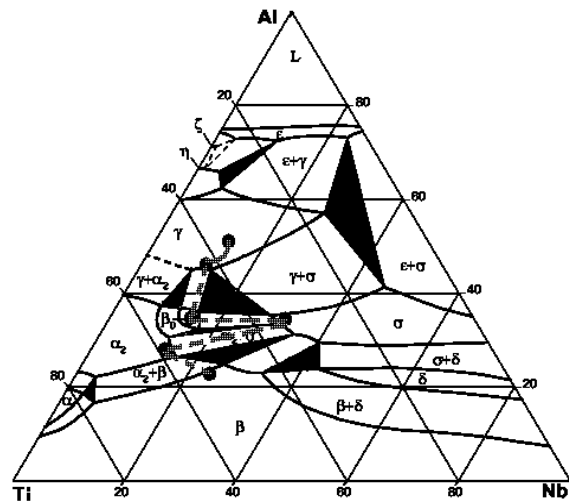
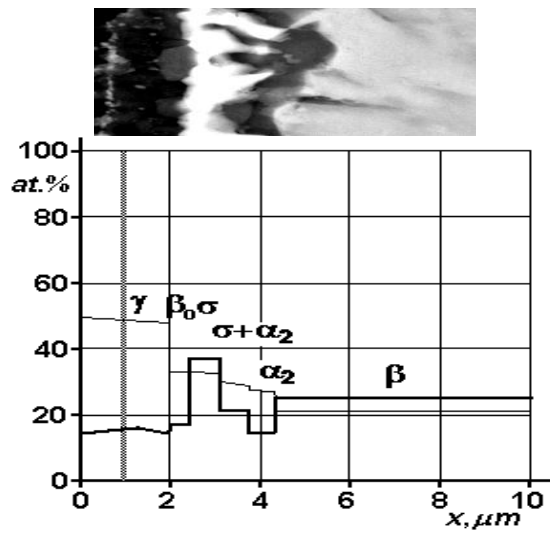
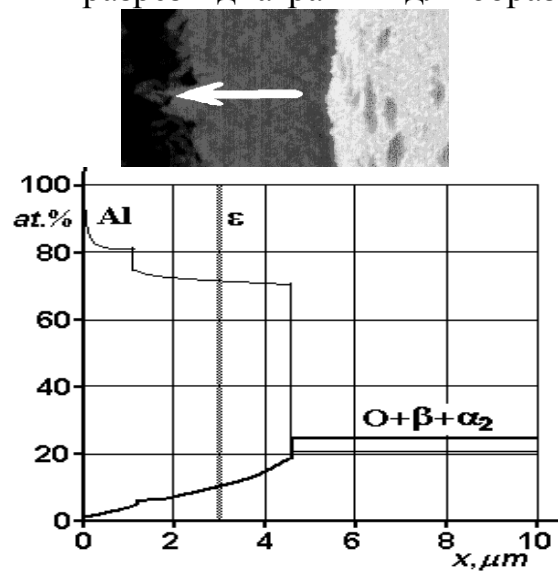
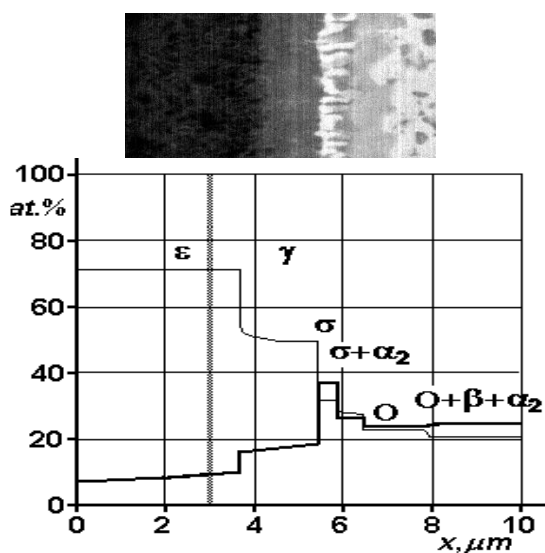


Рисунок 2. Микроструктура, концентрационные кривые, изотермические разрезы диаграммы для образцов временем нагрева 2 часа на 1 этапе

**Образец 2**

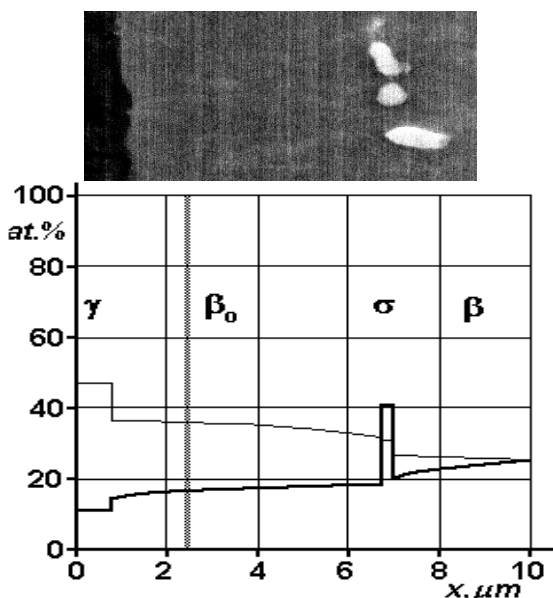
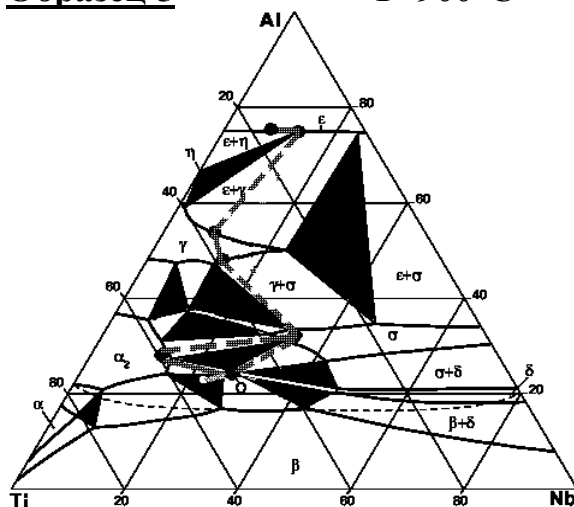


— Al —  
- - - Nb



**Образец 5**

$T=900^{\circ}\text{C}$



**Образец 6**

$T=1000^{\circ}\text{C}$

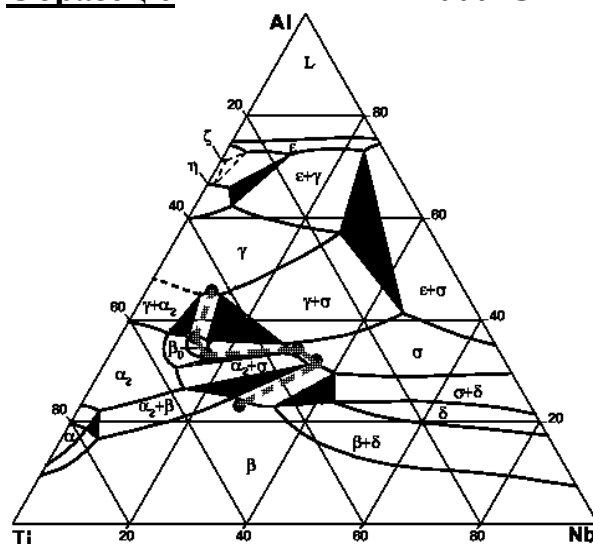


Рисунок 3. Микроструктура, концентрационные кривые, изотермические разрезы диаграммы для образцов временем нагрева 6 часов на 1 этапе

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В серии экспериментов показана возможность синтез композита, состоящего из чередующихся слоев различных интерметаллидных фаз титана ниобия алюминия. Получена высокая сплошность соединения при отсутствии трещин. Продемонстрирована возможность регулирования фазового состава за счет механического введения алюминия в ходе спекания. Предложенные режимы синтеза, которые могут регулироваться в зависимости от установленных требований.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ:

1. Романьков С.Е. Синтез титаноалюминидных покрытий методом механического сплавления и последующего отжига на поверхности титана и алюминия / С.Е. Романьков, С.Д. Калошкин, Л.Ю. Пустов // ФММ. 2006. Т. 101. № 1. С. 65...73.
2. A. Hellwig. Phase equilibria in the Al-Nb-Ti system at high temperatures / A. Hellwig, M. Palm, G. Inden // Intermetallics 6. 1998. P. 79...94.
3. Юровских А.С., Демаков С.Л., Колосова Е.В. Особенности структуры и фазового состава слоистого материала Ti 23Al 26Nb / Al, полученного методом плазменно-искрового спекания //МиТОМ. 2012. №9. С. 35...40
4. Raghavan V. Al-Nb-Ti (Aluminum-Niobium-Titanium) // Journal of Phase Equilibria and Diffusion. V. 31. № 1. 2010. P. 47...52.